第2章

GHz設計，常識・非常識

～集中定数による設計と分布定数による設計の境界線を知る～

津野 徹

第1章では，数百MHzの信号を扱う際に，GHzに関する知識が不可欠であることを説明した．ここでは，そのGHz回路に関するコモンセンスを紹介する．（編集部）

携帯電話やギガ・ビットEthernetなどに見られる，機器の高速化や，それらの機器の無線化など，電子回路技術者にとって，近年ほどGHzの知識と技術が必要とされている時代はありません．

本稿におけるGHzとは，一般的に300MHz～3GHzの極超短波帯（UHF），3GHz～30GHzのマイクロ波帯（SHF），30GHz～300GHzのミリ波帯（EHF）と呼ばれている領域の中で，1GHz近辺，またはそれ以上の周波数とします．本特集ではこのGHzについての疑問を平易に説明していきます．

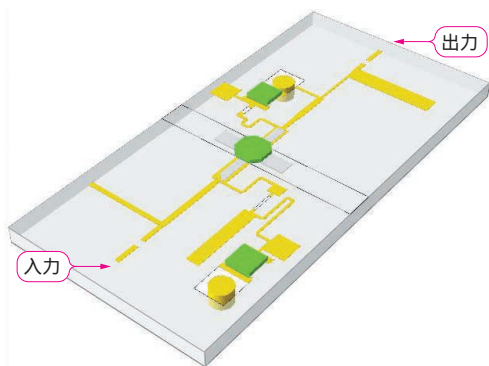



図1 10GHz LNA（Low Noise Amplifier）の設計例
あくまでもイメージ，配線パターンの意味を理解できなくてもよい．

1 誰がGHzの知識を必要とするのか

現場では誰がどのようなときにGHzの知識を必要とするのでしょうか．以下にGHzの知識と技術が必要な分野を挙げます．

● FPGAやLSIの開発者および評価技術者

最近のLSIは，HDMI（High Definition Multimedia Interface）やPCI Express，HD-SDI（High Definition Serial Digital Interface）など，信号周波数が数百MHz～数GHzのシリアル・インターフェースに対応しているものがあります．また，DDR2やDDR3といったメモリのパラレル・バスも，数百MHzから数GHzの信号を扱っています．そのため，否応なしにGHzに関する知識を求められます．

● プリント配線板パターン設計者および評価技術者

1GHz以上の信号を扱う回路は，配線パターンの引き方や幅，間隔などにおいて，分布定数回路の知識が必要です．要点としては，

（a）スタブの発生の抑制
（b）配線パターンの50Ω化
（c）配線パターン同士の間隔の取り方
（d）パターンの終端の仕方

などを覚えておく必要があります．

KeyWord
MMIC，DQPSKトランスポンダ，アンテナ，分布定数回路，集中定数回路，プロードライザ，NOCOIL，シミュレータ，同軸ケーブル

● 専用IC設計者および評価技術者

MMIC（Microwave Monolithic Integrated Circuit）の設計者も，マイクロ波シミュレータなしでは物作りができません．図1に10GHz LNA（Low Noise Amplifier）の設計例を示します．マイクロ波シミュレータでは，部品実装も含めたレイアウトができます．

● ネットワーク機器の設計者および評価技術者

最近のネットワークは高速化により，40GHzなどといった高い周波数を利用するシステムが製品化されています．例として，横河電機のDQPSKトランスポンダが挙げられます．

システムのコンポーネント設計には，マイクロ波シミュレータが不可欠です．このようなシステムは100kHz～40GHzという超広帯域で信号を処理しなければならないので，最高に設計が難しい分野です．図2にMMICの回路例を示します．このICは電子の遅延を伝送線路で保証しながら，多段で増幅回路を構成します．ちょうどトランジスタも含めたゲインのある50Ω伝送線路という設計思想です．

● 自動車など衝突防止レーダの設計者および評価技術者

自動車の場合，レーダの周波数はマイクロ波帯（3GHz～30GHz）やミリ波帯（30GHz～300GHz）を使用します．レーダは，昔ならば導波管，ホーン・アンテナ，マグネトロン，クライストロンなどのメカ部品で構成されました．現在はプリント基板アレイやパッチ・アンテナ，MMICで構成されています．安価で小型，低消費電力，取り扱いやすさなどに優れています．

● アンテナ設計者および評価技術者

無線通信においては，搬送波にGHzを使うことが多く，必然的にGHz回路の知識が求められることはいうまでもありません．アンテナは3次元形状であり，3次元に電波を放射，吸収するので，3次元電磁界シミュレータの出番となります．例えば，携帯電話は人体による電波吸収などの影響により，通常のホイップ・アンテナだけでは送受信感度が得られません．2本目の逆F型アンテナやチップ・アンテナを追加して，総合的な送受信感度を得るように設計されています．

アンテナ形状は無限にあり，今でも新型アンテナが次々と発表されています．このようなアンテナ設計は，3次元的にクリエイティブな発想をする能力が必要です．図3(a)に筆者の設計した2.5GHz 4素子パッチ・アンテナの基板を，図3(b)にその電波放射パターンを示します．

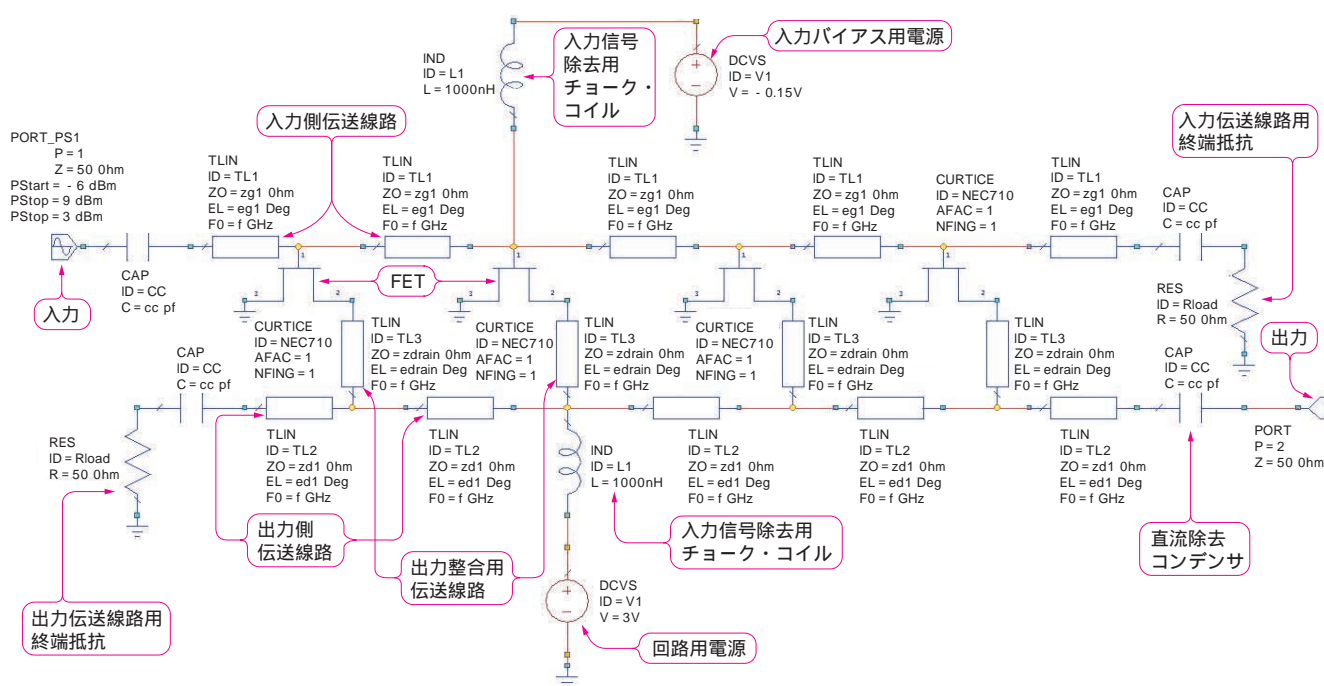



図2　MMICの回路例
あくまでもイメージ，実際これを設計できなくてもよい．

図4の放射パターンは，設計初期における失敗例です．パッチの向きを変えただけで，このような放射パターンになってしまいました．このまま製品化していたら，市場で問題が起きていたかもしれません．3次元シミュレータのおかげで不具合を未然に防ぐことができた格好の例です．

2 MHzとGHzでは何が違うのか

● 分布定数回路理論を理解する

数MHzと数GHzではまるっきり世界が違ってしまいます．数MHzでは信号の伝搬する遅延を無視できる集中定数の考え方が通用しますが，数GHz帯では分布定数回路理論を使用します．本来，電子回路そのものは分布定数回路であり，細かい部分を無視して近似した回路が集中定数回路となります．近似できなくなった周波数が，数GHz帯ということになります（図5）．

電子回路を構成する部品には，以下のものがあります．

① 抵抗（レジスタ）……………単位；Ω（オーム）
② コンデンサ（キャパシタ）…単位；F（ファラッド）
③ コイル（インダクタ）………単位；H（ヘンリー）

上記部品の定数は，例えば100Ω，0.1μF，10μHなどのように，固定の数値で表されます．これらは集中定数の部品で，これらの部品で構成された回路が集中定数回路です．100MHz以下の周波数で使用される定数です．正確には，「集中定数回路とは，回路の寸法が波長に対して無視できる（近似が可能な）分布定数回路の特殊な場合」と考えられます．上記部品も100MHz以上の周波数では複雑な等価回路となり，周波数により値が変わります．

④ 同軸ケーブル
⑤ プリント基板（インピーダンス制御パターンなど）
⑥ ツイスト・ペア・ケーブル
⑦ フラット・ケーブル

上記部品の電気特性は固定値ではなく，$Z=\sqrt{L/C}$ などの関数（特性インピーダンス）で表され，これを分布定数回路と言います．集中定数がたくさん集まったものとして考えられ，「分布」と言う言葉があてがわれています．等価回路はコンデンサやコイルを実際の長さだけ従属接続したものです．100MHz以上の周波数で使われる関数です（図6）．

⑧ 半導体

半導体の等価回路を集中定数回路で表したものがSPICEパラメータです．また，高い周波数（分布定数回路領域）で使えるように，周波数と電力で表したものがSパラメータとなっています（図7）．Sパラメータについては第5章で解説します．

● GHz帯まで周波数特性が確保されたLやCがある

数MHzの回路は集中定数回路といい，コイル（L），コンデンサ（C），抵抗（R）と半導体で構成されています．ところがGHz帯では，分布定数回路の考え方が用いられます．

図4　図3の設計初期における失敗例
パッチの向きを変えただけで，このような放射パターンになった．3次元シミュレータのおかげで不具合を未然に防ぐことができた格好の例．

（a）プリント基板

（b）シミュレーション結果

図3　筆者の設計した2.5GHz，4素子パッチ・アンテナ基板

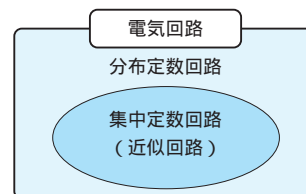



図5　分布定数回路と集中定数回路の関係
電子回路そのものは分布定数回路であり，細かい部分を無視して近似した回路が集中定数回路となる．

LやCはパターンで作成され，抵抗と半導体が主要な実装部品となります．パターンは1/4波長で共振しますから，周波数帯域は2倍（1オクターブ）程度しかありません．

ところが，最近の光通信のように，30kHz～40GHzのような超広帯域な回路が必要な場面が出てきました．このような回路では，基本的に広帯域な周波数特性を持つLやCが必要になります．通常のLやCの周波数特性はMHz帯止まりですが，このような超広帯域回路では，GHz帯まで周波数特性が確保されたLやCが必要となります．

NECトーキンのデカップリング・デバイス「プロードライザ」や興和電子工業の広帯域巻線型コイル「NOCOIL」などは，大容量と高インダクタンスを確保しつつ，GHzまで周波数特性を確保した驚異的なコンデンサとコイルです．本来はいくつものコンデンサやコイルによってフィルタリングされていた周波数帯域を，単体で実現できます．プロードライザの外形を**写真1**に，周波数特性を**図8**に示します．同じようにNOCOILの外観を**写真2**に，周波数特性を**図9**に示します．

● 配線パターンも部品の一部である

GHz回路では，パターンが部品となってしまいます．部品と部品をパターンでつなぐという概念は通用しません．パターンも部品の一部として設計しなければなりません．

第3章 **図12**に配線パターンによるGHz回路例を示しました．電源パターンもバイパス・コンデンサやパターン・コイル，オープン・スタブなどでGHz信号を遮断してから引き回します．さらに，回路間をつなぐ信号線はマイクロストリップ線路などインピーダンスを整合させた伝送線路で配線します．**図10**にプリント基板による伝送線路の種類を示します．

● 広い通過帯域を持つ回路の設計が難しい

GHz帯は，波長とパターンの長さが近くなります．パターンの長さが信号の1/4波長になると共振してしまいます．従って広い通過帯域を持つ回路の設計が難しくなります．通常の分布定数回路設計における周波数帯域は約2倍（1オクターブ）となるので注意が必要です．

GHz帯においては，変調などを利用することによって情報量が多くとれますから，狭帯域でも信号を十分に伝送できます．

広い通過帯域を持つ回路を設計する際は，集中定数回路の概念か，分布定数回路の従属（カスケード）接続を使うなどしなければなりません．以下，広い通過帯域を持つ回路の設計例を示します．

① 広帯域トランジスタと広帯域コイル

広い通過帯域を持つ回路は，広帯域トランジスタ（ドイツ Infineon Technologies社「BFP620」，f_T＝65GHz）と広帯域なコイル（コニカル・コイル，NOCOILなど）を使っ

（a）集中定数回路

（b）分布定数回路

図6　分布定数回路と集中定数回路では，使用する部品が異なる

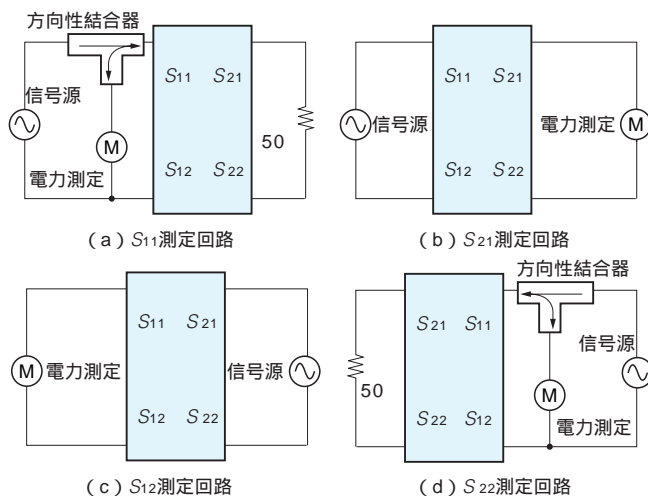



図7　Sパラメータの測定図

半導体の等価回路を，分布定数回路領域で扱えるように，周波数と電力で表したものがSパラメータである．

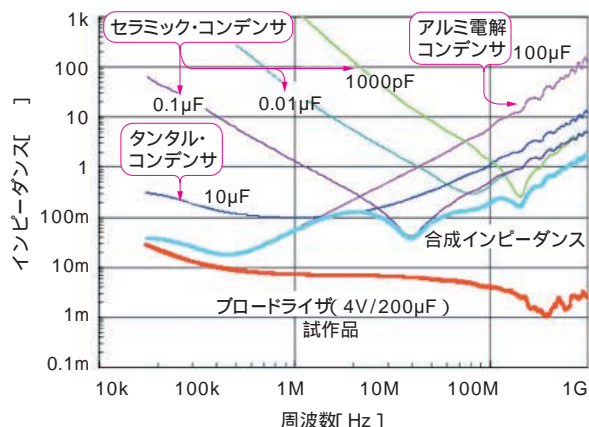



図8[2]　ブロードライザの周波数特性

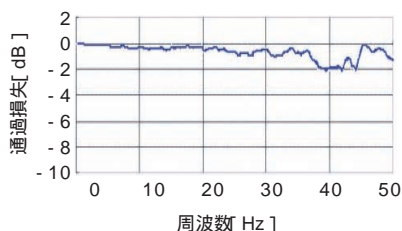



写真1[2]　ブロードライザの外観

図9[3]　NOCOILの周波数特性

写真2[3]　NOCOILの外観

$$Z_0=\frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}}\ln\left[\frac{1.9(2H+T)}{0.8W+T}\right]$$

(a) ストリップ線路

$$Z_0=\frac{87}{\sqrt{\varepsilon_r+1.41}}\ln\left[\frac{5.98H}{0.8W+T}\right]$$

(b) マイクロ・ストリップ線路

(c) コプレナー・ウェーブガイド線路

(d) 差動ストリップ線路

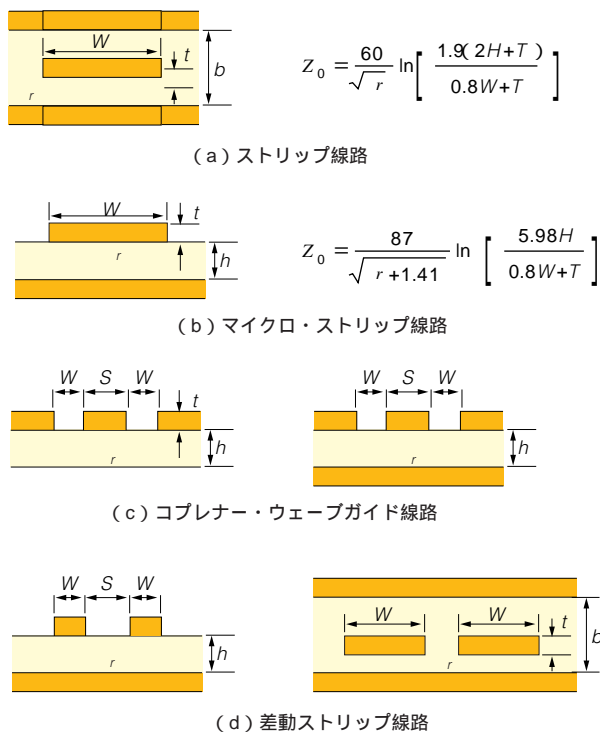



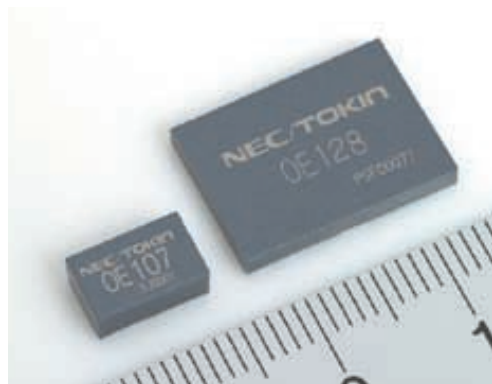
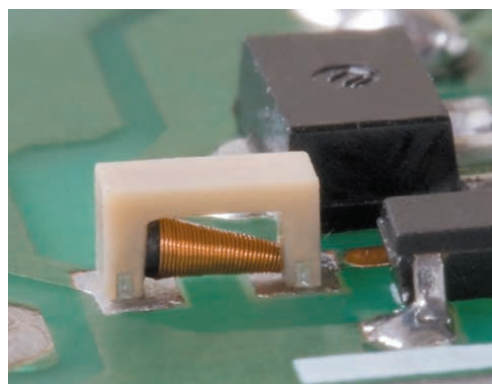
図10　プリント基板による伝送線路の種類

て設計します．ただし，広帯域トランジスタを10GHz以上の回路で使う際，パッケージの状態では寄生*LC*分の影響を受けるため性能が出ません．そのため，チップ状態で使用します．従って，ワイヤ・ボンディングなどを施す設備が必要となります．もはやプリント基板ではなくMMICの中で配線しなければなりません．

図11にBFP620のパッケージの寄生*LC*等価回路を示します．超高周波トランジスタは真ん中のトランジスタ・チップがSPICEデータで供給されますが，パッケージのリード・インダクタンス(L_{BI}，L_{BO}など*L*の付いた素子)や浮遊容量(C_{CB}など)もシュミレーションに入れないと，正確な結果が得られません．

ここが重要！　10GHz以上の回路は，プリント基板上で配線するのではなくMMIC内で配線します．

② IC内部に設けられるコイル

半導体内部に使用周波数帯域の1/4波長以下で作成された微小コイルがあるとします．この微小コイルを，マイクロ波シミュレータを使い外形1mm×1mmで作成した例を

L_{BI} =	0.47	nH
L_{BO} =	0.53	nH
L_{EI} =	0.23	nH
L_{EO} =	0.05	nH
L_{CI} =	0.56	nH
L_{CO} =	0.58	nH
C_{BE} =	136	fF
C_{CB} =	6.9	fF
C_{CE} =	134	fF
Valid up to 6GHz		

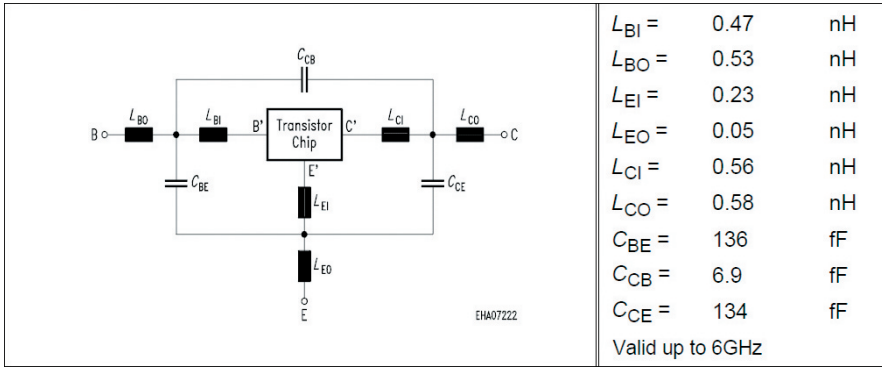



図11[5]　**BFP620のパッケージの寄生*LC*等価回路**

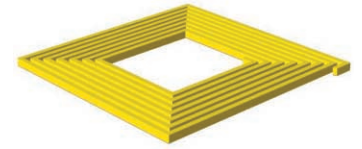



図12　マイクロ波シミュレータで作成した微小コイル

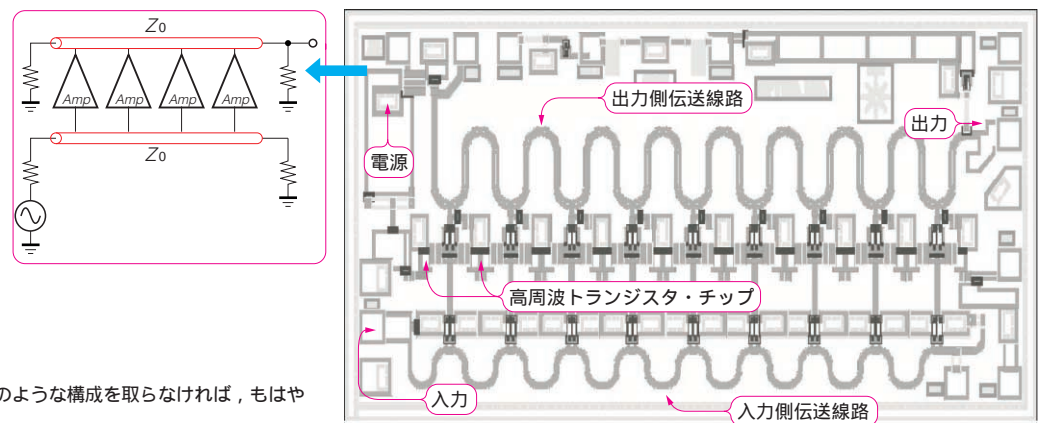



図13
分布定数増幅回路
GHz帯を扱う広帯域アンプは，このような構成を取らなければ，もはや作れない．

図12に示します．微少コイルは半導体エッチング技術で作成されます．プリント板エッチング方式では，100μm±20μm程度の精度しか取れないので，微小コイルは作れません．

ここが重要！　GHz帯において，1/4波長以下の集中定数部品は，広帯域回路作成上のキー・コンポーネントとなります．

③ 分布定数増幅回路

分布定数増幅回路は，電子の移動速度と回路の遅延を合わせた多段のアンプで構成された増幅回路で，Traveling Wave Guide Amplifireといいます．MMICの例を**図13**に示します．GHz帯を扱う広帯域アンプは，このような構成を取らなければ，もはや作れないのです．

● ガラス・エポキシ基板は損失が大きい

通常のプリント基板はガラス・エポキシ（FR-4）基板を使用します．FR-4は損失が大きく（誘電正接$\tan\delta > 0.02$），誘電率εも周波数依存性を持ちます（$\varepsilon = 4.5 - 0.1x$，xには1GHzなら1，2GHzなら2といった値が入る）．従ってシミュレーションを行う際には，基板モデルに必ず誘電正接の値を入れます．

高周波基板材料としてはBTレジン材が有名ですが吸湿性があるため，最近は米国ROGERS社（代理店はプリンテック）のRO4003などが使われます．RO4003は伝送損失がフッ素樹脂基板に近く，温度特性も変化せず優秀な特性を示します．第1章の**図3**に，各種プリント基板の伝送損失と温度特性を示します．

伝送損失と温度特性の面から，1GHz以上の帯域では，FR-4を使わないのですが，コスト面から使われる場合があります．この場合は損失をIC側で補正しながら使います．シミュレーションで補正係数などを求めておくと，量産時における不具合の発生を最小にとどめることができます．

● 基板もケースも電子部品も共振してしまう

GHz回路においては，プリント基板もシールド・ケースも実装部品も共振する可能性があります．

第1に，部品のグラウンドとグラウンドをつないだ長さが共振周波数の1/2波長の長さで共振します．

第2に，部品のグラウンドとオープン点（プリント基板のコーナからコーナなど）までの長さが共振周波数における1/4波長の長さで共振します．

例えば25mm間隔のスタッドでシャーシ止めしたプリント基板は，25mmが5.76GHzの1/2波長なので5.76GHzで共振します．

図14に25mm×25mmのプリント基板の共振例を挙げます．シミュレーションでは5.6GHzに共振点が観測されます．また，7.5cmの高さの部品は1GHzの1/4波長なので1GHzで共振します．7.5mmの高さの部品は10GHzで共振するので，10mmの高さの電解コンデンサなどは全く使用できないのです．高周波部品の実装においては，表面実装部品で低く実装しなければならないことが納得できると思います．

シールド・ケースを使うときにも十分に気をつける必要があります．60mmの高さのシールド・ケースは，2.5GHzで1/2波長となるので，2.5GHzで共振します．シールド・ケースに同軸コネクタを取り付けただけで簡単に信号が通過してしまいます．さらに2.5GHz以上の周波数の整数倍はすべて通過します．このようなGHz帯では，部品の寸法や形状にも気を使わないといけません．

3 GHzに関するシミュレータにはどんなものがあるのか

GHz帯に対応するシミュレータにはどんなものがあるのでしょうか．SPICE系シミュレータでは，まるっきり歯が立ちません．SPICE系シミュレータは集中乗数回路用のシミュレータです．つまり，近似計算シミュレータなのです．

GHzに関するシミュレータは，電界と磁界を正確に計算するシミュレータです．従って，計算も複雑で時間がかかります．1時間かかるシミュレーションも珍しくなく，中には一晩かかるシミュレーションもあります．**図15**は，13.5MHz RFIDの電磁界シミュレーションの例です．筆者のパソコン（CPUはAthlon 64 3400+，2GHz）で約1時間の計算時間がかかります．条件を変えて最適値を求めるには，1週間ほど時間がかかることもあります．

電磁界シミュレータの計算は，パソコンではなくスーパ・コンピュータの世界です．実際にCPUを複数個搭載したワークステーションも発売されています．そのためなのか分かりませんが，シミュレータは高価で，安いものでも500万円以上します．以下，GHzに関するシミュレータについて述べます．

● 高周波回路設計者が一人前になるまでに10年…そんなに待てない！

最近はマイクロ波シミュレータが，デスクトップ・パソコンでも扱える時代になりました．そのため，高周波回路設計者が一人前になるまでに10年というのは昔の話になってきました．しかし，シミュレータを使いこなすには，そ

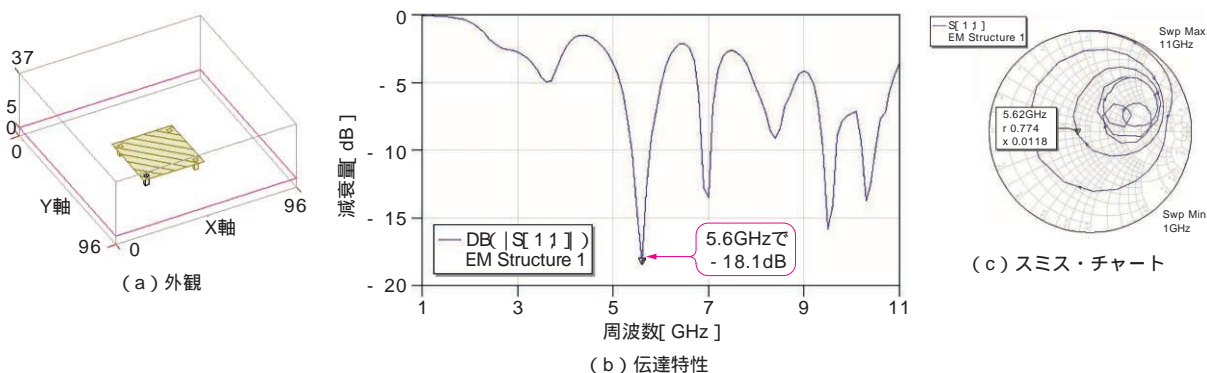



図14　25mm×25mmのプリント基板の共振例
プリント基板を25mm間隔のスタッドでシャーシ止めした．25mmは，5.76GHzの1/2波長なので，5.76GHzで共振する．

れ以前の高周波回路の知識なども必要になるので，それらの知識を持った人が一つのシミュレータを使いこなすまでに1年は必要でしょう．さらに，いろいろなシミュレータと実機の相関を取るために3～4種の高周波関連のシミュレータを使うことになるかと思います．すると，実機製作を含め，マスタするまでに10年というのはあながち間違っているとは思いません．

● 最後はやっぱりベテラン頼み？

「マスタするまでに10年…やっぱりベテラン頼みなのかぁ」と，思われるかもしれません．そんなことはありません，若い人もどしどしマイクロ波回路に挑戦してください．そこで壁に突き当たったら，先輩やセミナの講師[注1]などに質問すればよいのではないかと思います．

● シミュレータのおおよその価格とできること

電子回路シミュレータには，

① 集中定数系SPICEシミュレータのOrCAD PSpice（米国Cadence Design Systems社），SIMetrix（オランダCatena社），B2 Spice（米国Beige Bag Software社）
② 分布定数系シミュレータのMicrowave Office（米国Applied Wave Research社），S-NAP（エム・イー・エル）
③ 3次元電磁界解析シミュレータのHFSS（米国Ansoft社），MW-Studio（エー・イー・ティー・ジャパン），SONNET（米国Sonnet Software社）

などがあります（**表1**）．

①は主にL（コイル），C（コンデンサ），R（抵抗），Tr（トランジスタ），OP AMP（OPアンプ）などの回路解析を得意とします．②はプリント基板とL，C，R，Trなどの素子で構成された回路解析が得意です．③は主にアンテナなどの3次元の物体の電磁界放射解析などをシミュレーションします．

価格は，①は数万円～数十万円，②は数十万円～500万円，③は500万円～1千万円以上です．①はアマチュアでも購入可能ですが，②と③は大企業以外に購入および維持は難しいです．なぜなら保守契約料が年間30％くらいかかるので，例えば，1千万円のソフトウェアは毎年300万円の維持費が必要となるからです．

● シミュレータ選択の基準

①の集中定数系SPICEシミュレータでは，残念ながらGHz帯の回路には対応できません．なぜなら，配線パターンの電磁結合が計算できないからです．GHz帯で使えるシミュレータは，②の2次元電磁界シミュレータや，③の3次元電磁界解析シミュレータなどです．

②は主にプリント基板とその近傍空間の電磁結合の計算を得意とするシミュレータです．③はアンテナなど3次元の物体の電波伝搬などの計算を得意とするシミュレータです．このシミュレータはモデルを3次元で入力する必要があるため機械系3次元CADとの連携も必要です．以下，設計者ごとの選択基準を示します．

②2次元電磁界シミュレータ
・通常のマイクロ波プリント基板回路設計者

注1　例えばCQセミナ時の筆者．年に4回以上開催．

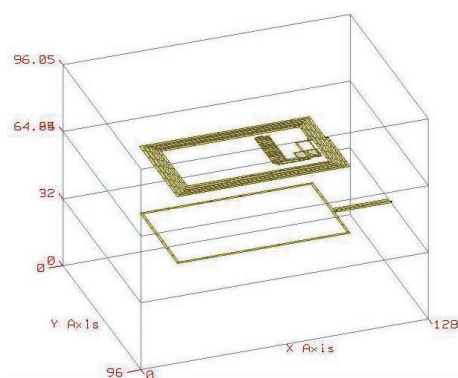



図15　13.5MHz RFIDの電磁界シミュレーションの例
細かい意味を理解する必要はない．

表1　電気設計者向けシミュレータの例

	回路シュミレータ		電磁界シュミレータ		
	0次元	1次元	2次元	3次元	4次元
	$x, y, z << \lambda$	$x, y >> \lambda$	$z << \lambda$	x, y, z, 任意	x, y, z, t
アルゴリズム	回路網理論		モーメント法	FEM	FD-TD，TLM
理論の難易度	簡単		最も複雑	複雑	比較的簡単
パラメータ算出	非常に簡単		やや面倒		非常に面倒
シュミレータ	SPICE	TINA PSpice B2 Spice	Microwave Offece, Sonnet, S-NAP	HFSS MW-Studio	Microstrips
最適な応用分野	低周波回路	長線路高周波回路，ディジタル回路	結合線路回路，多層基板	導波管回路	パルス信号を扱う電磁場分野，プラズマ研究など
計算機負荷	非常に小さい		小さい	大きい	非常に大きい
価格	無料もあり	数万円～数十万円	約100～500万円	約500～1000万円	約500万円

・RFID設計者

③3次元電磁界解析シミュレータ

・アンテナ設計者

・ICパッケージなど部品の電磁界解析

4 GHz設計への取り組み方

● 代々受け継がれてきた回路を改良する

昔は扱うデータの量が少なかったため(音声など)，高周波回路は狭帯域設計でした．従ってスミス・チャートなどを使って，使用周波数だけのインピーダンス整合を取れば，おおよその回路は設計できました(図16)．

現在は40Gbps光パケット通信に見られるように，30kHz～40GHzまでフラットな周波数特性を持つ回路が要求されています．高周波技術者は困難な設計を強いられています．もはやマイクロ波シミュレータなしでは夜も昼も明けません．

基本的に昔の高周波技術は，通信機器主体の狭帯域回路です．最新の広帯域回路にそのまま応用できません．ただし，最近は広い帯域に対応する部品が出てきたので，これらを使えば広帯域化が可能です．シリコン・ゲルマニウム(SiGe)を利用した半導体であれば，f_T(利得帯域幅)が65GHzのものもあります．

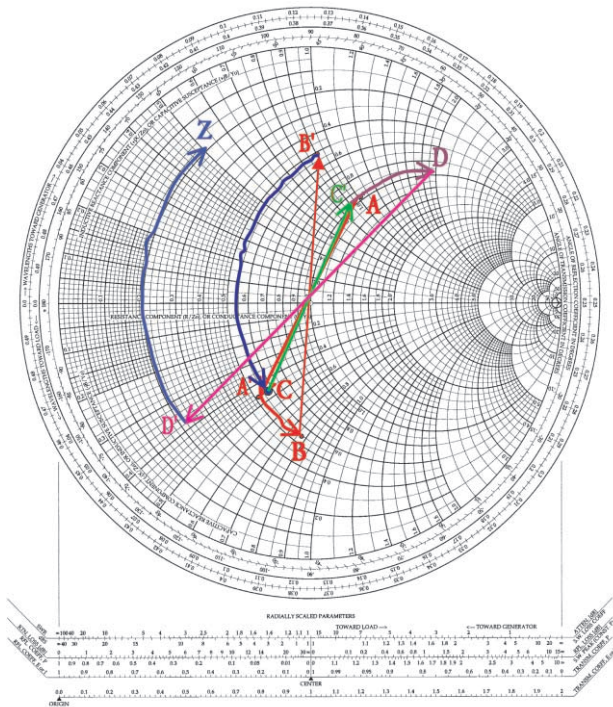



図16 スミス・チャートによるインピーダンス整合

あくまでもイメージ，意味を理解できなくても良い．

コイルは50GHzまで，チップ・コンデンサは数GHzまで使えるものもあります(例えば村田製作所のマイクロチップ・コンデンサなど)．電源のデカップリング・コンデンサは1GHzまで使えるものもあります．昔から存在した分布定数回路をMMICで構成した回路では，30kHz～40GHzの帯域を誇るものもあります(図13)．

昔は部品の性能が良くなかったので，回路技術で補っていました． 最近の部品の高周波化により，このような代々受け継がれてきた回路を改良することで，現在でも立派に通用する回路を作ることが可能です．

● 新規参入組はどうすれば良いか

新規参入組は，以前のしがらみがありませんので，近代的なCADによるGHz回路の設計ができます．積極的にマイクロ波シュミレータを活用しましょう．

5 携帯電話において受信モジュールをCPUに接続する際にはGHzの知識は必要か

高周波機器は一般的に図17のようなブロック図で表されます．データの搬送波に使用されるような高い周波数は，そのままではデータを処理できないため，中間周波数に変換されます．中間周波数は，Internal Frequency(以降IF)と呼ばれ，どのような周波数とも混信を起こさないように素数の周波数で構成されています．

455kHzはAMラジオのIFです．10.7MHzはFMラジオのIFです．米国Hewlett Packard社(現在はAgilent Technologies社)の測定器は，帯域を広く取るために10.7MHzの2倍の21.4MHzを中間周波数に選んでいます．この中間周波数は世界的に守られており，間違ってもこの周波数を発生させたり機器の内部信号として使ってはいけません．

受信モジュールを演算CPUに接続するときは，この中間信号から復調してベース・バンド信号を抜き出して使用します．そのため，受信信号は最終的には数MHzになります．従って，携帯電話の受信モジュールを演算CPUに接続する際には，GHzまたはそれに準ずる知識は必要ありません．

6 1GHzの方形波を伝送したい．ふさわしい伝送路の仕様は？

1GHz以上のディジタル波形を伝送できるケーブル（市販されているもの）には，以下の種類があります．

① IEEE 1394ケーブル

パソコンの外部インターフェース・ケーブルです．通常はa規格で400Mbps（50Mバイト/s）ですが，最近はb規格が追加され，800Mbps（100Mバイト/s）が市販されています．IEEE 1394bで追加される主な特徴を**表2**に示します．

② eSATAケーブル

パソコンの1.5Gbps，3Gbps内部シリアル・インターフェースを外部に取り出すために拡張されたケーブルです．現在市販されているものは1.2Gbps（150Mバイト/s）の規格となっています．ほかの方式との比較を**表3**に示します．

③ Fibre Channel

Fibre Channelは，主にストレージ・ネットワーク用に使用されています．ファイバ・チャネルはINCITS（International Committee for Information Technology Standards）のT11技術委員会が標準化したものです．T11はANSI（American National Standards Institute）が信任した委員会です．規格を**表4**に示します．

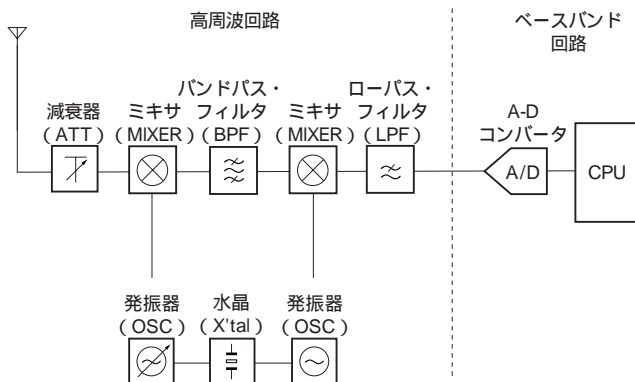



図17　一般的な高周波機器のブロック図
ブロック図については第3章で解説する．

表2　IEEE 1394bの規格

高速化	800Mbps～3.2Gbps
長距離化	～100m
伝送媒体の追加	石英ファイバ，プラスチック・ファイバ，UTP
光ファイバのための仕様の追加	初期化の方式，符号方式

Fibre Channelは当初，スーパーコンピュータなどで使われ始めたのですが，ストレージ・エリア・ネットワークにおいて，大規模ストレージを接続する際の標準規格となりました．

Fibre Channelは，光ファイバ・ケーブルだけでなく，銅線のより対線ケーブルでも構築可能です．現在，Fibre Channel製品としては，4Gbpsのものがあり，8Gbps規格のものは開発中です．10Gbpsの規格もすでにありますが，製品はまだ存在しません．

④ InfiniBand

InfiniBandの物理層は，10Gビット EthernetやFibre Channelと同じIEEE 802.3zに基づきます．現行の規格では，一方向当たりの信号帯域幅が2.5Gbpsと規定されています．データ符号化方式には8B/10B符号化方式を採用しているため，データ転送速度は最大250Mバイト/sとなります．

複数の接続を束ねて高速化を図る手法もサポートされており，4本束ねる「4X」では10Gbps，12本束ねる「12X」では30Gbpsの信号帯域幅を確保できます．現在のシステム性能では，もはや1Xでは速度面のメリットが出ないことから，多くのシステムでは4X以上の構成をとっています．なお，InfiniBandのリンクは全2重通信をサポートしているため，双方向の合計帯域幅はそれぞれ5Gbps，20Gbps，60Gbpsとなります．

以上のことから，市販のインターフェース・ケーブルで1GHzの矩形波を伝送したい場合はeSATA，ファイバ・

表3　eSATAと他方式との比較

項　目	eSATA	SAS	PATA	IEEE1394b	USB 2.0
実効速度	2.4Gbps	3.0Gbps	1064Mbps	786Mbps	～375Mbps
最大ケーブル長	2m	6m	46cm	4.5m	5m
外部電源	要	要	要	不要	不要
ホットプラグ	可	可	不可	可	可
デバイス数	1	128	2	63	127

表4　Fibre Channelの規格

項　目	値
データ転送速度	1Gbps，2Gbps，4Gbps，8Gbps（検討中）
最大ケーブル長（光ファイバの場合）	10km
最大ノード数	126台（FC-AL型），1678万台（FC-SW型）
データ伝送単位	シリアル
接続形式	コネクション型およびコネクション・レス型
ビット・エラー・レート	10^{-12}以下

チャネル，InfiniBandなどを使うのがよいでしょう．同軸ケーブルを使えば数十GHzの信号も伝送できますが，同軸集合コネクタ（図18）などが一般には普及していませんし，高価です．

7 基板と基板をまたぐときの伝送路は？ やっぱり同軸ケーブル？ フレキ・ケーブル？

表題の疑問にお答えします．100MHz以上のディジタル信号をパラレル（並列）接続する際には，スキュー・アジャストなどの問題が生じます．従ってフレキ・ケーブルは100MHzまでとしたいところです．100MHz以上の信号は必然的に同軸構造のケーブル（50Ω不平衡ケーブルや100Ω平衡ケーブルなど特性インピーダンスが規定されたもの）を用いたシリアル・インターフェースとなります．

● 実験レベル

プリント基板上で配線するには，潤工社のDFS020というフッ素樹脂ケーブルを使用するとよいでしょう．フッ素樹脂は400℃まで燃えませんから，はんだごてでも焦げません．これを図19のように末端を処理すると，ケーブルの外部導体とパターンとの短絡を防ぎ，かつ，短い距離で配線できます．筆者の経験では以前，LSIテスタのテスト治具において，100本以上の同軸ケーブル配線の一部が短絡しました．末端処理をしていなかったため，どこが短絡しているのか解決できませんでした．配線し直しの工数と納期遅れの損失は大きなものにもなりました．「急がば回れ」が正解です．

● コンポーネント・レベル

実験レベルでは同軸ケーブルでもよいのですが，製品に採用するには市販品の中から選ばなくてはなりません．eSATAケーブル（写真3）などが市販品にあります．

● システム・レベル

システムなどでたくさんの同軸配線を脱着するときは，図18に示した集合同軸コネクタを使用すると一度にたくさんの同軸配線を取り外しでき，毎日システムを管理している現場の作業者に喜ばれます．

最近，筆者が好んでシステムに採用している集合同軸コネクタを紹介します．これはFCIジャパンの角形集合同軸コネクタで，最大74本の同軸コネクタを一度に脱着できます．また，DCピンとの混在配線もできます．しかも，この集合同軸コネクタは，1ピンあたり，7Aもの電流が流せるのです．従って，このコネクタ1種類だけで，システムの配線がすべて完結します．

● 同軸ケーブルの種類

同軸ケーブルにはさまざまな種類がありますが，大きく3種類に分類でき，ほとんどの場合はこれで間に合います．電電公社規格の「＊D2V」，「＊C2V」と，MIL（Military Specifications and Standards）仕様の「RGケーブル」です．それぞれ用途に合わせた太さの種類が存在します．例えば，3D2V，5D2V，10D2V，RG-58/Uなどです．

＊D2Vは50Ω系のケーブルであることを表します．細

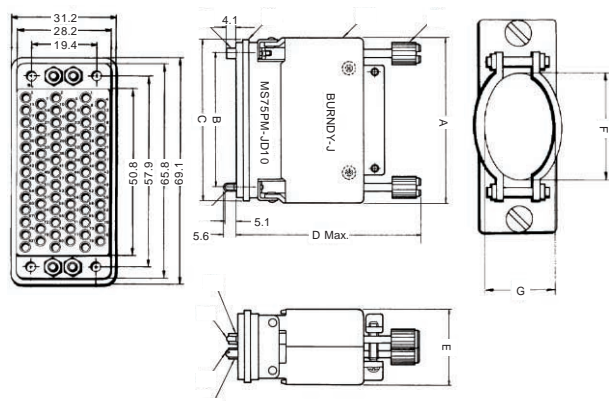



図18　同軸集合コネクタの外観

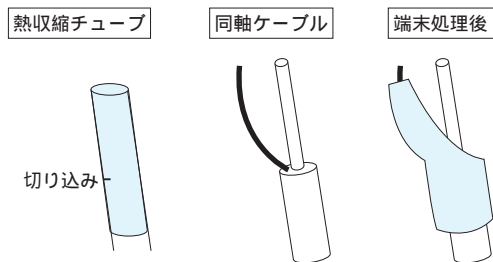



図19　同軸ケーブルの末端処理
ケーブルの外部導体とパターンとの短絡を防ぎ，しかも短い距離で配線できる．

表5　同軸コネクタの種類と特徴

タイプ	プレシジョン・タイプ			スタンダード・タイプ		ミニチュア・タイプ		
シリーズ	APC-7	APC-N	APC-3.5	N,NC	BNC,3C	SMA	SMB	SMC
外観								
接続方式	ねじカップリング(Sexless)	ねじカップリング	ねじカップリング	ねじカップリング	バヨネット・ロック	プッシュ・オン	プッシュ・オン	スクリュー・オン
適合ケーブル	7mmエアー・ライン UT-250 UT-325 RG-214/U	7mmエアー・ライン UT-141 UT-250 UT-325 RG-214/U	3.5mmエアー・ライン UT-085 UT-141	3D-2V,5D-2V,7D-2V 10D-2V,5D-2W 3C-2V,5C-2V,7C-2V 10C-2V,5C-2W RG-5,6,8,9,10,12,14,18,58,59,62,74/U	1.5D-2V,2.5D-2V, 3D-2V,5D-2V, 3D-2W,5D-2W 1.5C-2V,2.5C-2V, 3C-2V,5C-2V,10C-2V 3C-2W,5C-2W RG-55,58,59,62,179/U	1.5D-QEW 1.5D-XV 3D-2W RG-174/U RG-55,58A/U UT-141 MX-50-3.6	1.5D-2V 1.5D-2N 1.5D-QEW 1.5D-XV RG-174/U RG-176/U	1.5D-2V 1.5D-2N 1.5D-QEW 1.5D-XV RG-174/U RG-196/U
特性インピーダンス［Ω］	50	50	50	50/75	50/75	50	50	50
周波数特性［GHz］	0～18	0～18	0～34	0～10	0～4	0～18 (セミリジッド・ケーブル) 0～12.4 (編組ケーブル)	0～4	0～10
電圧定在波比（*VSWR*） *f*：周波数［GHz］	1.003＋0.002 *f*	1.08(max)	1.01＋0.004 *f*	1.2(max) (1G～4GHz)	1.3(max)	1.05＋0.005 *f* (セミリジッド・ケーブル) 1.15＋0.01*f* (RG-55/U)	1.2(max)	1.2(max)
定格電圧［V_{RMS}］	AC1000	AC1000	AC500	AC500	AC500	AC500	AC500	AC500
使用温度範囲［℃］ ＊：絶縁体の材質名	＋13～＋33	＋13～＋33	－65～＋85	－55～＋199(TFE*)	－55～＋199 (TFE*) －55～＋85 (Rexolite*)	－55～＋199(TFE*)	－55～＋199(TFE*)	－55～＋199(TFE*)
関連規格	―――	―――	―――	JIS-C-5411 MIL-C-39012 DSP-C-6201 BTS-4114	JIS-C-5412 MIL-C-39012 DSP-C-6202 BTS-4115 NTT Spec.No.2095	MIL-C-39012	JIS-C-5415 MIL-C-39012 DSP-C-6205	JIS-C-5415 MIL-C-39012 DSP-C-6205
挿入損失［dB_{max}］ *f*：周波数［GHz］	$0.007\times\sqrt{f}$	$0.03\times\sqrt{f}$	$0.015\times\sqrt{f}$	―――	―――	―――	―――	―――

2

写真3[4]　eSATAケーブルの外観

写真4[1]　マイクロ波ケーブルの外観

いものから，1.5D2V（φ3mmくらい），3D2V（φ5mmくらい），5D2V（φ7mmくらい），10D2V（φ10mmくらい）となっています．

＊C2Vは75Ω系のケーブルであることを表します．細いものから，1.5C2V（φ3mmくらい），3C2V（φ5mmくらい），5C2V（φ7mmくらい），10C2V（φ10mmくらい）となっています．

RGケーブルはMIL仕様のケーブルです．50Ωや75Ω以外に，いろいろなインピーダンスがありますので，選択には十分な注意が必要です．

これらのケーブルは1GHzまでの周波数伝送に向くと考えたほうが無難です．1GHz以上の伝送においては，マイクロ波ケーブル（**写真4**）と呼ばれるものを使用します．これはアルミはくなどで100％被覆を施したもので，高周波の損失や特性インピーダンスの誤差が正確に管理されたものです．

● 同軸コネクタの種類

同軸コネクタを大きく分けると，標準測定器用と汎用に分けられます．さらに特性インピーダンス50Ω系と，75Ω系に分類できます．また，同じ種類でも，組み合わせるケーブルの太さごとに製品が存在するので，注意が必要です．標準測定器用は挿入損失が規定されているのが特徴で，ネットワーク・アナライザなどに使われます（**表5**）．

GHzの信号伝送，光を使う手もある？

表題の疑問ですが，通常数mの距離では，銅線ケーブルとの差はあまりありません．数百m以上の伝送距離になると，銅線の損失が大きくなり伝送不可能となります．そこで損失の少ない光ファイバ（石英ガラス・ファイバなど）を使用することになります．最近では40Gbps（5Gバイト/s）の超高速光ファイバ伝送も実用化されています．

皆さんにおなじみのパソコンとオーディオを接続する光ファイバは，廉価なプラスチック製で，コモン・モード・ノイズのアイソレーション用として，ノイズ対策目的で使われています．

参考・引用＊文献

(1) ＊IW高周波同軸ケーブル，エーイーティー．
http://www.aetjapan.com/hardware/pdf/iw.pdf
(2) ＊プロードライザの周波数特性，NECトーキン．
http://www.nec-tokin.com/product/proadlizer/application.html
(3) ＊広帯域巻線型コイル，興和電子工業．
http://www.kowa-denshi.com/product/coil/nocoil.html
(4) ＊CFD-ESATD05，エレコム．
http://www.elecom.co.jp/photo/p01/CFD-ESATD05_01.jpg
(5) ＊BPF620データシート，Infineon Technologies AG.

つの・とおる
横河電機（株）